

تصميم جهاز لقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر

الدكتور هيثم جبيلي*
الدكتور بهجت إبراهيم**
حسن أيوب***

(تاريخ الإيداع 7 / 7 / 2009. قُبِلَ للنشر في 2009/10/22)

□ الملخص □

تم في هذا العمل تصميم وتصنيع جهاز صغير لقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر بطريقة بسيطة واقتصادية باستخدام مواد متوفرة محلياً، واستنتجت المعادلات الرياضية التي تمثل أساساً لإجراء القياسات على هذا الجهاز اعتماداً على الأثر الحراري التبادلي للإشعاع الشمسي المباشر في الجسم الأسود. أجريت قياسات عدّة لشدة الإشعاع الشمسي المباشر في أزمنة متعددة ضمن المنطقة المستهدفة، وقد تبين من خلال مقارنة نتائج هذه القياسات مع تلك المحسوبة نظرياً وجود تطابق جيد بينهما، وكما لوحظ أيضاً من خلال التحليل الرياضي للحسابات أنها تتميز بالسهولة المباشرة.

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي المباشر - الجسم الأسود - تبادل الحرارة - قانون نيوتن للتبريد.

* أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Design A Device for Measuring The Intensity of Direct Solar Radiation

Dr. Haisam Jbeli *
Dr. Bahjat Ibrahim **
Hassan Ayub ***

(Received 7 / 7 / 2009. Accepted 22/10/2009)

□ ABSTRACT □

In this work, a small device was designed and manufactured for measuring the intensity of direct solar radiation in a simple and economic method by using available local materials, and the mathematical equations that represent the basis for the measurements on this device were concluded depending on exchangeable thermal effect of direct solar radiation in the black body.

Multiple measurements of the intensity of direct solar radiation in multiple times within the target area were made. It turned out by comparing the results of these measurements with those theoretically calculated there was a good match between them, as it was also noted through mathematical analysis of calculations they are characterized by direct easiness.

Key words: direct solar radiation, black body, the heat exchange, Newton's law of cooling.

* Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate Student, Department of Physics, Faculty of Sciences, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

ينعكس جزء من الإشعاع الشمسي solar radiation الواصل إلى سطح الغلاف الجوي للأرض وينفذ الجزء الباقي إلى داخل هذا الغلاف، حيث يمكن أن يخضع لعمليات عدّة (امتصاص-انتثار) ويصل قسم منه إلى سطح الأرض بشكل إشعاع مباشر وإشعاع منتشر. والجدير ذكره هنا أن الإشعاع الشمسي المباشر (العمودي) Direct Solar Radiation هو الإشعاع الوارد من الشمس مباشرة والذي يستقبل على سطح مستوي معامد لمسار الإشعاع الشمسي، أما الإشعاع المنتشر Diffuse Radiation فهو جزء الإشعاع المنتشر Scattering الذي يسقط على سطح الأرض من جميع أنحاء السماء (نصف الكرة العلوي) عدا الإشعاع القادم من قرص الشمس مباشرة [1].

ويعبر الثابت الشمسي عن شدة الإشعاع الشمسي الكلي العمودي على وحدة المساحة في وحدة الزمن عند سطح الغلاف الجوي للأرض الذي يحوي جميع الأطوال الموجية [2]. والثابت الشمسي، رغم كونه يسمى ثابتاً، إلا أنه في الحقيقة لا يكون كذلك بل تتغير قيمته بتغير بعد الأرض عن الشمس ويكون المقصود هنا قيمة متوسطة للثابت الشمسي والمساوية حوالي $1367 W/m^2$ [3، 4]، قيست هذه القيمة بوساطة الأقمار الصناعية فوق سطح الغلاف الجوي للأرض [4]. وتتناقض قيمة ثابت الإشعاع الشمسي المباشر بتأثير عوامل الامتصاص والانتثار للغلاف الجوي، لتصل إلى النصف تقريباً عند سطح الأرض [4، 5].

لقد قام الكثير من الباحثين بقياس الإشعاع الشمسي الكلي (المباشر والمنتشر) تجريبياً في مناطق من سورية [1]، [6]. كما قام آخرون بإيجاد صيغ نظرية لحساب الإشعاع الشمسي الكلي في إيران [7، 8].

تستخدم البيرهليومترات Pyrheliometers لقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر [1]، لكن بسبب كلفتها المرتفعة وحاجتها للعناية المستمرة، فإن الإشعاع الشمسي المباشر يتم تقديره أو بحسب اعتماداً على الإشعاع الكلي والإشعاع المنتشر [9].

لقد قمنا في هذا العمل بتصميم وتصنيع جهاز لقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر باستخدام مواد من السوق المحلية وبتكلفة بسيطة مقارنة مع كلفة البيرهليومتر العالية كما أشرنا أعلاه. بالإضافة لذلك يتميز هذا الجهاز بسهولة الاستعمال والنقل من مكان إلى آخر. كما أن نتائج القياس التي تم الحصول عليها بوساطته أمكن مقارنتها بسهولة مع النتائج النظرية بالاعتماد على معادلات بسيطة كما سنبين فيما بعد.

أهمية البحث وأهدافه:

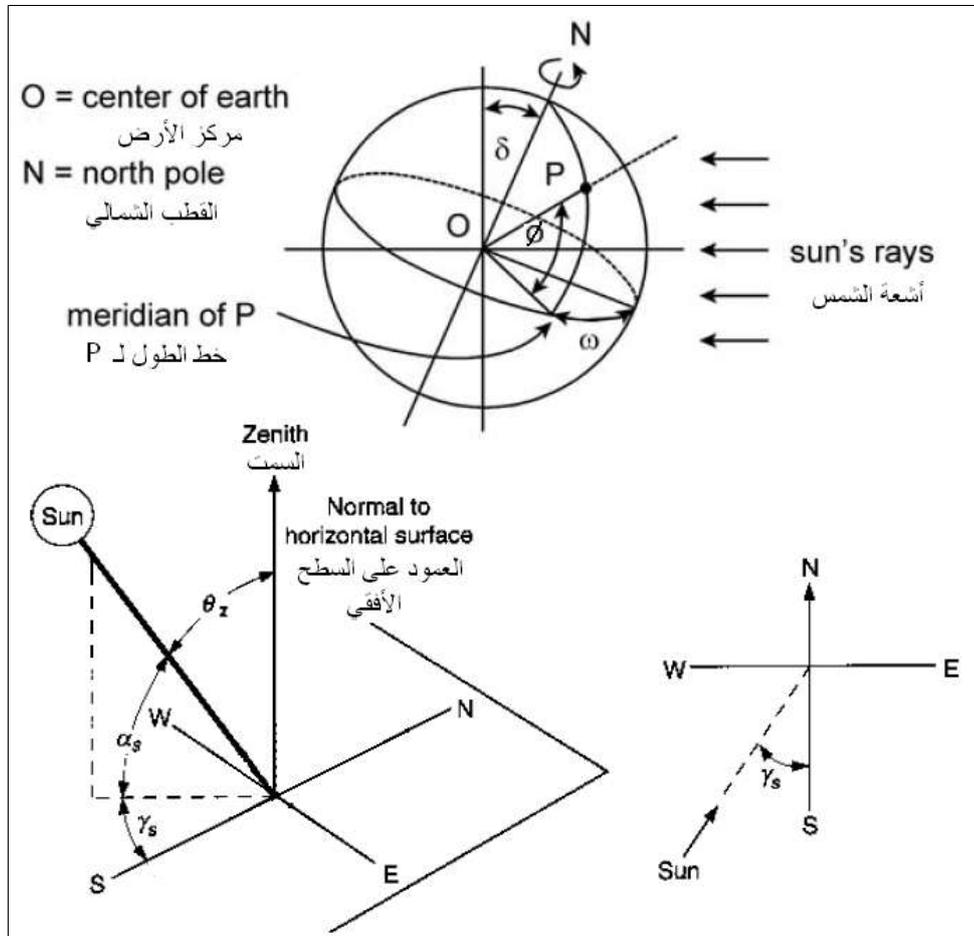
يمثل قياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر أساساً لأية مشاريع أو مخططات لاستغلال الطاقة الشمسية، حيث توفر مثل هذه القياسات الموثقة المعلومات الضرورية الكاملة عن مردود هذه المشاريع قبل إنفاق المبالغ الضخمة لبنائها [10]. ويمثل جهاز قياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر الهدف الرئيس في هذا البحث حيث قمنا بتصميمه وتصنيعه. ويتميز هذا الجهاز عن الأجهزة الأخرى المستخدمة في هذا المجال بأنه قليل التكلفة، بسيط التصميم وسهل العمل، يقيس كامل الطيف الضوئي الوارد من الشمس، يصلح للقياسات الحقلية إذ يمكن نقله بسهولة من مكان لآخر، ولا يحتاج لمعدات إضافية.

طرائق البحث ومواده:

نعتمد في بحثنا هذا على طرق التبادل الحرارية، حيث تم الاعتماد على العلاقات الفيزيائية الناتجة عن التبادل الحراري في تصميم الجهاز المستخدم، والذي نسميه IDSRTEmeter اختصاراً لـ (Intensitometer of Direct Solar Radiation with Thermal Effect)، سنستخدم هذا الاختصار للدلالة على اسم الجهاز فيما يأتي من هذا العمل.

1- الموجز النظري لحساب شدة الإشعاع الشمسي المباشر:

يتغير البعد النسبي للأرض عن الشمس خلال العام، وتتغير شدة الإشعاع الشمسي المباشر الذي يصل سطح الأرض. تعرف شدة الإشعاع الشمسي المباشر على سطح الغلاف الجوي للأرض بالثابت الشمسي I_0 الذي يساوي حوالي $1367 W/m^2$. إن قيمة الثابت الشمسي غير ثابتة إذ تتغير بتغير بعد الأرض عن الشمس بحوالي 3.5% بسبب إهليلجية مدار الأرض حول الشمس [10]. والإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض تتغير شدته من مكان لآخر حسب موقع النقطة الجغرافي على سطح الأرض حيث يتغير الموضع الظاهري للشمس. إن الزوايا التالية والمبينة بالشكل (1) تعد أساسية لحساب الموضع الظاهري للشمس في السماء من نقطة P على سطح الأرض [3، 5]:



الشكل (1): الزوايا الشمسية.

حيث:

δ زاوية الميل declination angle؛ وهي الزاوية بين المحور القطبي للأرض والعمود على الأشعة الشمسية؛ $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

ϕ زاوية خط العرض الجغرافي latitude؛ $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ، وتكون موجبة شمال خط الاستواء.

ω زاوية الساعة hour angle؛ وهي الإزاحة الزاوية للشمس شرق أو غرب المستوي المار بخط الطول

المحلي، وذلك بسبب دوران الأرض على محورها بسرعة $15^\circ/h$ ، وهي موجبة قبل منتصف النهار وسالبة بعده.

θ_z زاوية السمт zenith angle، وهي الزاوية بين العمود على السطح الأفقي للراصد وأشعة الشمس الواردة

في النقطة P .

α_s زاوية الارتفاع الشمسي solar altitude angle، وهي الزاوية بين المستوي الأفقي وأشعة الشمس الواردة

في النقطة P ، وهي الزاوية المتممة لزاوية السمت θ_z .

γ_s زاوية السمт الشمسي solar azimuth angle، وهي الزاوية بين مسقط الأشعة الشمسية على المستوى

الأفقي المار بالنقطة P واتجاه الجنوب، وهي سالبة بجهة الشرق وموجبة بجهة الغرب.

تُحسب زاوية الميل δ من علاقة كوبر Cooper الآتية [3، 9]:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{(n + 284)}{365}\right) \quad (1)$$

حيث n رقم اليوم من السنة، ويأخذ قيمة ضمن المجال $\{1, 365\}$.

لحساب زاوية السمт θ_z تستعمل العلاقة الآتية [3، 9]:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega \quad (2)$$

يمكن حساب زاوية الساعة ω من العلاقة الآتية [5]:

$$\omega = (t_{sol} - 12 h) \frac{360^\circ}{24 h} \quad (3)$$

حيث $t_{sol}(h)$ الوقت الشمسي ويحسب اعتماداً على الوقت المحلي $t_{loc,siv}(h)$ من العلاقة [5]:

$$t_{sol} = t_{loc,siv} + \frac{E_t}{60 \text{ min/h}} \quad (4)$$

يحسب الوقت المحلي بدءاً من توقيت غرينتش $t_u(h)$ وخط طول meridian نقطة القياس λ من العلاقة [6]:

$$t_{loc,siv} = t_u + \frac{\lambda}{15} \quad (5)$$

وتدعى E_t (بوحدة الدقائق) معادلة الوقت وتعطى كالتالي [5]:

$$E_t = 87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (6)$$

حيث:

$$B = 360^\circ \times \left(\frac{n - 81}{364}\right) \quad (7)$$

بما أن α_s و θ_z متتامتان فإن [3، 5]:

$$\sin \alpha_s = \cos \theta_z \quad (8)$$

إذاً تسمح العلاقات (1-8) بحساب زاوية السمات θ_z وكذلك زاوية ارتفاع الشمس α_s من أي مكان على سطح الأرض وفي أي يوم من العام. وتستخدم زاوية السمات أو زاوية ارتفاع الشمس لإيجاد معامل الكتلة الهوائية m Air Mass باستخدام علاقة كاستن ويانغ Kasten and Young التالية [3]:

$$m(z, \theta_z) = \frac{\exp(-0.0001184z)}{\cos \theta_z + 0.5057(96.080 - \theta_z)^{-1.634}} \quad (9)$$

حيث z ارتفاع مكان القياس عن مستوى سطح البحر مقدراً بالمتر، و θ_z تؤخذ بالدرجات.

بعد إيجاد معامل الكتلة الهوائية يمكن حساب نفاذية الغلاف الجوي في المكان المدروس من العلاقة الآتية [5]:

$$\tau_{am} = 0.5[\exp(-0.65m(z, \theta_z)) + \exp(-0.095m(z, \theta_z))] \quad (10)$$

أخيراً تعطى شدة الإشعاع الشمسي المباشر I_{dir} النظرية في منطقة القياس بالعلاقة الآتية [5]:

$$I_{dir} = I_0 \times \tau_{am} \quad (11)$$

2- الموجز النظري لعمل الجهاز:

يعتمد عمل جهاز الـ IDSRTEmeter على تعريض جسم أسود black body (انظر الرقم 20 من الشكل 3) للإشعاع الشمسي المباشر، حيث يمثل الجسم الأسود قرصاً من معدن الألمنيوم مطلياً بالأسود وموضوعاً داخل أنبوبة عازلة. في البداية تكون درجة حرارة الجسم الأسود θ مساوية لدرجة حرارة الهواء المحيط θ_{air} ، ثم تبدأ بالارتفاع نتيجة تعرضه للإشعاع. إن كمية الحرارة Q المكتسبة في الجسم الأسود المستخدم خلال الفترة الزمنية Δt والتي تقابل ارتفاعاً $\Delta \theta$ في درجة حرارته تعطى بالعلاقة [4]:

$$Q = cm \cdot \Delta \theta \quad (12)$$

حيث: c الحرارة النوعية لمادة الجسم الأسود و m (kg) كتلته.

ومن جهة أخرى فإن كمية الحرارة التي حصل عليها الجسم من الإشعاع تعطى بالعلاقة [12]:

$$Q = I_{dir} \cdot A \cdot \Delta t \quad (13)$$

حيث: I_{dir} (W/m²) شدة الإشعاع Radiation Intensity المباشر (الطاقة الإشعاعية الواردة في وحدة الزمن على وحدة السطح العمودية على مسار الأشعة الواردة)، A (m²) سطح الجسم الأسود المعرض للإشعاع، Δt (s) زمن التعرض. من العلاقاتين السابقتين نجد:

$$I_{dir} = \frac{cm}{A} \cdot \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (14)$$

ستستمر درجة الحرارة في الجسم الأسود بالارتفاع حتى تصبح مساوية θ_{max} وهي درجة الحرارة المقابلة لحالة التوازن الحراري في الجسم الأسود مع الوسط المحيط، عندها يمكن حساب $\Delta \theta / \Delta t$ بتطبيق قانون نيوتن للتبريد (التسخين من أجل حالتنا) على هذه الجملة. يعطى قانون نيوتن للتبريد بالعلاقة التالية [4، 13]:

$$\frac{d\theta}{dt} = -k(\theta_1 - \theta_2) \quad (15)$$

حيث: θ_1 (°C) درجة الحرارة الابتدائية للجسم، θ_2 (°C) درجة الحرارة النهائية التي يبلغها عند التوازن، k (s⁻¹)

ثابت موجب يتعلق بنوع الجسم وأبعاده الهندسية.

فإذا كان $\theta_1 < \theta_2$ يكون لدينا حالة تسخين ويكون $d\theta/dt > 0$ ، وإذا كان $\theta_1 > \theta_2$ يكون لدينا حالة تبريد

ويكون $d\theta/dt < 0$. نوجز ما يحدث للجسم الأسود كما يلي:

1- $\theta = \theta_{air}$ الجسم في حالة توازن حراري مع الهواء المحيط، ويسخن فقط بتأثير الإشعاع الوارد.

2- $\theta_{max} > \theta > \theta_{air}$ والجسم هنا يسخن بتأثير الإشعاع الوارد ويبرد بتأثير الهواء المحيط.

3- $\theta = \theta_{max}$ وهنا يصبح الجسم في حالة توازن حراري مع الوسط المحيط.

وبمكاملة المعادلة (15) بالنسبة إلى الزمن على اعتبار $\theta_1 = \theta$ و $\theta_2 = \theta_{max}$ نجد:

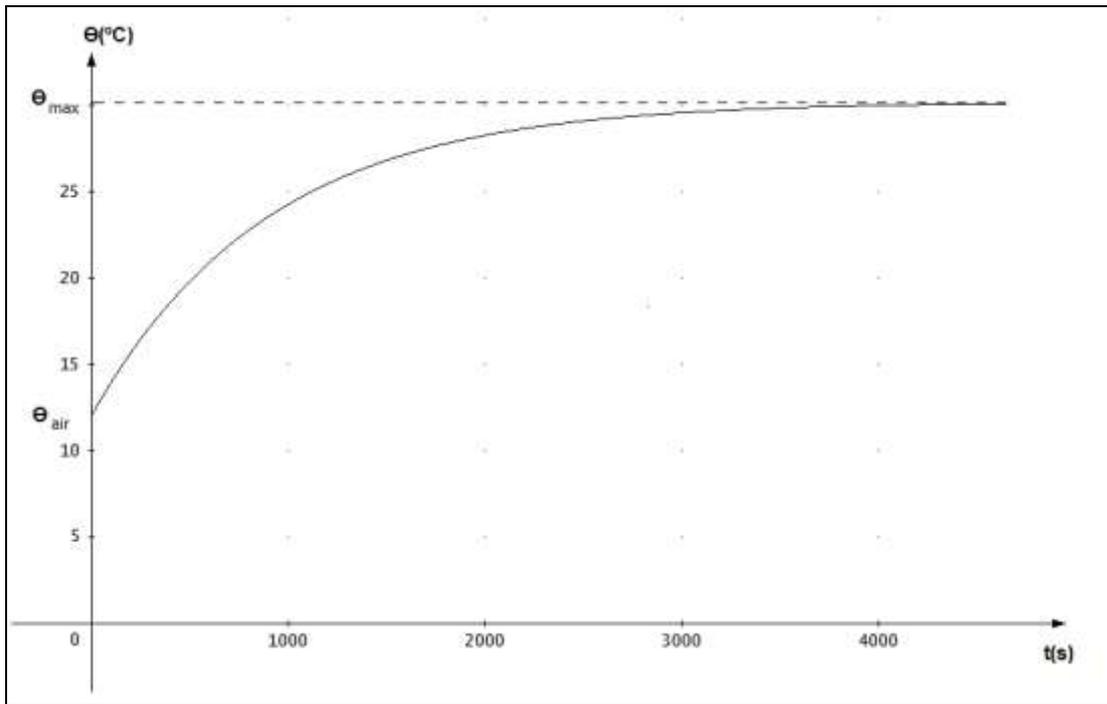
$$\int_{\theta_{air}}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta - \theta_{max}} = -k \cdot \int_0^t dt \quad (16)$$

ومنها نجد:

$$\theta = -(\theta_{max} - \theta_{air}) \cdot \exp(-k \cdot t) + \theta_{max} \quad (17)$$

ونبين في الشكل (2) منحنى تحولات درجة حرارة الجسم الأسود المعرض للإشعاع بتابعية الزمن وفقاً للمعادلة

(17) التي حصلنا عليها:



الشكل (2): تغيرات درجة حرارة الجسم الأسود المعرض للإشعاع الشمسي بالنسبة للزمن.

وباعتبار نقطتي التوازن الحراري $\theta_1 = \theta_{air}$ و $\theta_2 = \theta_{max}$ وبتعويض $d\theta/dt$ من (15) في (14) نجد:

$$I_{dir} = \frac{cm}{A} \cdot k(\theta_{max} - \theta_{air}) \quad (18)$$

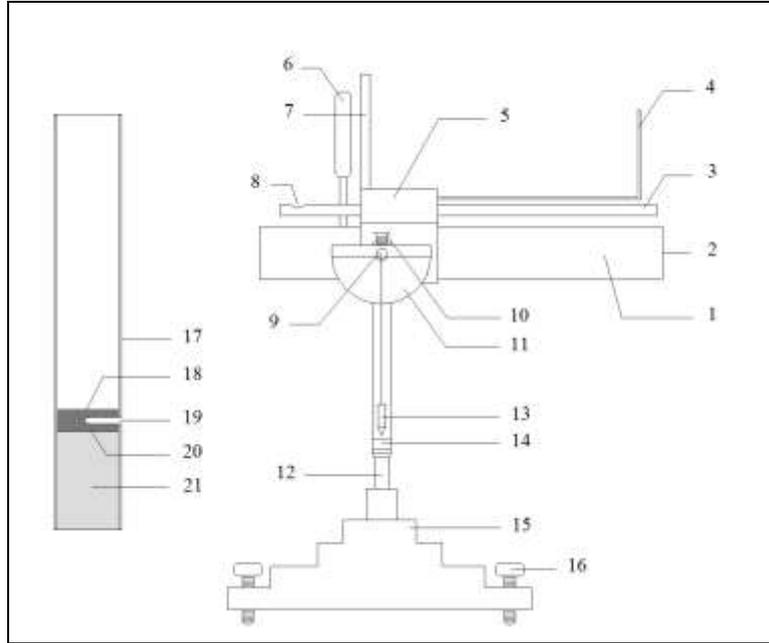
وبفرض $\Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{air}$ نجد:

$$I_{dir} = \frac{cm}{A} \cdot k \cdot \Delta\theta \quad (19)$$

تبين هذه العلاقة أن شدة الإشعاع الشمسي المباشر I_{dir} والواردة على سطح الجسم الأسود تتناسب مع الفرق بين درجة حرارة الجسم الأسود ودرجة حرارة الوسط المحيط. وقد قمنا بتصميم الـ IDSRTEmeter اعتماداً على المعادلتين (17) و(19).

3- تصميم وتصنيع الجهاز:

يبين الشكل (3) رسماً تخطيطياً لجهاز IDSRTEmeter والذي يستخدم لقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر بالإضافة لقياس زاوية ارتفاع الشمس:



الشكل(3): الرسم التخطيطي لجهاز IDSRTEmeter .

وتشير الأرقام المبينة عليه إلى الأجزاء المكوّن منها وفيما يلي نبين وظيفة كل جزء كما يأتي:

- 1- أنبوية الجهاز التي تسمح فقط بدخول الإشعاع الشمسي المباشر، والتمثيل الجانبي يبين مكوناتها.
- 2- نافذة دخول الإشعاع الشمسي المباشر.
- 3- أنبوية (منظار) توجيه كأداة ضبط توجيه أولى، توازي أنبوية الجهاز وتستخدم لتوجيهها.
- 4- سلك توجيه، أداة توجيه ثانية، تستخدم للتوجيه الدقيق، حيث يسقط ظل السلك على لوحة سلك التوجيه (الرقم 7).
- 5- حامل خشبي للسلك والمنظار.
- 6- مقياس حرارة رقمي. يقيس عُشر الدرجة، ومقدار الخطأ المطلق فيه هو $\Delta\theta = 0.1^\circ C$ من أجل المجال $[-47^\circ C, 125^\circ C]$ ، وتقع ضمن هذا المجال جميع قياساتنا لدرجات الحرارة خلال عملنا هذا.
- 7- لوحة سلك التوجيه، تحوي حقلاً مدرجاً يستقبل ظل سلك التوجيه في مركزه، يتم بواسطتها تتبع الحركة الظاهرية للشمس في السماء وتوجيه أنبوية الجهاز نحوها. ويستمر ظلها مقياس الحرارة الرقمي لحمايته من أشعة الشمس المباشرة.
- 8- نافذة الرؤية في المنظار، تحوي مرآة صغيرة تميل بزاوية 45° لسهولة الرؤية من أعلى الجهاز.
- 9- محور التدوير الأفقي، يسمح بدوران أنبوية الجهاز في مستو شاقولي.

- 10- بُزّال تثبيت المحور الأفقي.
 - 11- منقلة هندسية لحساب زاوية ارتفاع الشمس.
 - 12- محور التدوير الشاقولي، ويسمح بتدوير الجهاز في مستو أفقي.
 - 13- مطمار (ثقل معلق بخيط) لضبط التوازن الشاقولي لمحور التدوير الشاقولي، ويقوم مقام زئبقية.
 - 14- لوحة ضبط المطمار، تحوي حقلاً مدرجاً لإظهار الانحراف عن الوضع الشاقولي، حيث تمثل حالة التوازن هذه نقطة إنقواء ثقل الهزاز مع المسقط الشاقولي لنقطة تعليق خيط المطمار في مركز المنقلة الهندسية، وفي هذه الحالة يوازي خيط المطمار محور التدوير الشاقولي.
 - 15- قاعدة الجهاز.
 - 16- بُزّال ضبط التوازن الشاقولي لمحور التدوير الشاقولي، وهي تمثل مجموعة ثلاثية في رؤوس مثلث متساوي الأضلاع.
 - 17- أنبوية عازلة.
 - 18- السطح المطلي بالأسود، يعامد الإشعاع الشمسي الوارد.
 - 19- حفرة في الجسم الأسود لوضع مقياس الحرارة.
 - 20- الجسم الأسود، الذي يمثل قرصاً معدنياً مطلياً بالأسود يبلغ نصف قطره $r = 23.84 \times 10^{-3} m$ ، وسمكه $h = 19.23 \times 10^{-3} m$ ، وكتلته $m = 90.91 \times 10^{-3} kg$ ، تم اختياره من الألمنيوم عالي النقاوة كونه متوفرًا محلياً ويمكن الحصول عليه بدرجات نقاوة عالية ولديه ممانعة للصدأ وللعوامل الكيميائية الجوية، وتم التأكد من النقاوة بحساب الكثافة، وعليه اعتمدت القيمة النظرية للحرارة النوعية للألمنيوم.
 - 21- عازل حراري من النوع المستخدم في أجهزة التبريد، يسمح مع الأنبوية العازلة بالتبادل الحراري مع الوسط الخارجي فقط من خلال السطح المعرض للإشعاع نفسه.
- والشكل (4) يمثل صورة لجهاز IDSRTEmeter الذي تم تصنيعه.



الشكل(4): صورة جهاز IDSRTEmeter .

راعينا في تصميم هذا الجهاز أن يكون صغير الحجم وخفيف الوزن ليصلح للقياسات الحقلية، إضافة لمعايير الجودة والمتانة، حيث صنع من معدن الحديد في أجزائه المتحركة، أما أنبوبة الجهاز التي تحوي الجسم الأسود فاخترت من بلاستيك عازل حرارياً بشكل جيد وثابت ضمن مجال درجات الحرارة المقيسة، والأجزاء الأخرى كقاعدة الجهاز ولوحة التوجيه (تستر أيضاً ميزان الحرارة) فقد صنعت من الخشب وتم لف الأنبوبة بورق الألمنيوم العاكس وذلك لتحقيق أفضل عزل حراري ممكن للجسم الأسود في الجهاز عن الوسط المحيط بأجزائه غير المعرضة للإشعاع، والسماح فقط قدر الإمكان بالتبادل الحراري مع الخارج من خلال السطح المعرض للإشعاع نفسه، ويسمح التصميم بكل سهولة بقياس زاوية ارتفاع الشمس من خلال المنقلة الجانبية. كما وضعت القاعدة الخشبية للجهاز على مجموعة من ثلاثة بزالات لضبط الجهاز أفقياً في مكان القياس.

يقيس ميزان الحرارة المتصل مباشرة مع الجهاز درجة حرارة الجسم الأسود داخله، ونستعين بميزان حرارة آخر مماثل له ويوضع قريباً منه لقياس درجة حرارة الوسط المحيط. يمكن من خلال حركة أنبوبة الجهاز على المحورين الشاقولي والأفقي التحكم في توجيهها في أي اتجاه لمتابعة التغير في الموضع الظاهري للشمس، واستقبال الإشعاع الشمسي المباشر فقط.

4- حساب الثابت k للجهاز:

حتى يمكن استخدام الجهاز يجب حساب قيمة الثابت k في العلاقة (19)، ومن أجل ذلك نستخدم الإشعاع الشمسي المباشر نفسه، مستفيدين كذلك من وظيفة الجهاز الأساسية كمقياس لشدة الإشعاع الشمسي المباشر. ففي شروط السماء الصافية (الخالية من الغيوم والعكر الجوي) يمكن اعتبار شدة الإشعاع الشمسي المباشر ثابتة في فترة منتصف النهار (قبل وبعد منتصف النهار بحوالي نصف ساعة). من المعادلة (17) يمكننا حساب قيمة الثابت k للجهاز بالشكل الآتي:

$$\ln\left(\frac{\theta_{air} - \theta_{max}}{\theta - \theta_{max}}\right) = k \cdot t \quad (20)$$

ويفرض أن:

$$\ln\left(\frac{\theta_{air} - \theta_{max}}{\theta - \theta_{max}}\right) = \sigma \quad (21)$$

ومنها:

$$\sigma = k \cdot t \quad (22)$$

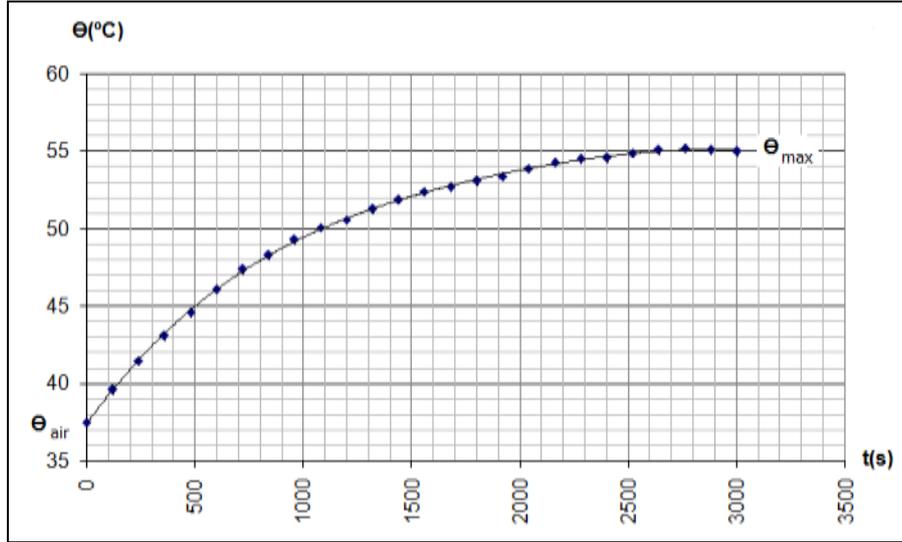
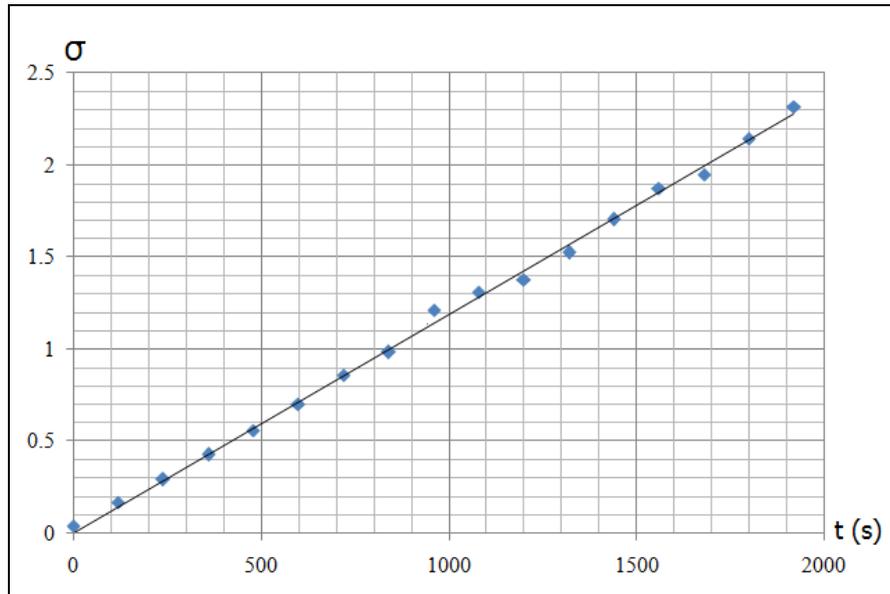
حيث سنستخدم المعادلة الأخيرة في حساب ثابت الجهاز k . باختيار أيام تكون فيها السماء صافية والهواء ساكن بشكل جيد، وتجرى التجربة في منتصف اليوم الشمسي للحفاظ على قيمة ثابتة للإشعاع الشمسي. يتم العمل وفق الخطوات التالية:

- 1- نهيئ الجهاز للعمل في وقت القياس حيث نوجه الأنبوبة بدقة باتجاه الشمس لتدخل أشعتها عمودية على سطح الجسم الأسود داخل الجهاز.
- 2- نأخذ نتيجة مقياسي درجة الحرارة كل دقيقتين.
- 3- نتابع في أثناء ذلك التغير في الموضع الظاهري للشمس في السماء لتلافي أية أخطاء قد تنتج عن ذلك من خلال ضبط ظل مؤشر التوجيه للجهاز على اللوحة المقابلة، لتبقى الأنبوبة موجهة نحو الشمس.

- 4- تبدأ درجة حرارة الجسم الأسود داخل الجهاز θ بالارتفاع لتصل لدرجة حرارة الهواء المحيط θ_{air} في منطقة التوازن الأولية، وتتجاوزها حتى تصل إلى درجة حرارة التوازن الحراري θ_{max} في منطقة التوازن النهائية.
- 5- رتبنا النتائج في الجدول (1)، حيث t : الزمن، θ_{air} : درجة حرارة الهواء المحيط، θ : درجة حرارة الجسم الأسود في الجهاز. نستمر في أخذ القياسات حتى الوصول لحالة التوازن الحراري مع الوسط المحيط.
- 6- رسمنا المنحني البياني لتحويلات درجة الحرارة θ داخل الجهاز بدلالة الزمن t لكامل مجال القياس فحصلنا على الشكل (5)، ثم أوجدنا قيمة $\theta_{max} = 55.2^\circ C$ وهي تقابل أكبر قيمة للفرق $\Delta\theta$ (مأخوذاً فيها تأثير الوسط المحيط عند الوصول لحالة التوازن). ويبين المنحني في الشكل (5) أنه مماثل للمنحني النظري الذي نتج لدينا في الشكل (2).
- 7- بدلنا قيمة θ_{max} في المعادلة (21) وحسبنا σ المقابلة لكل قيمة لدرجة حرارة الجهاز θ .
- 8- رسمنا تحولات σ بدلالة t ، الشكل (6)؛ وقد حذفنا منه بعض القيم الأخيرة كونها لا تعود منسجمة عندما تكون $\theta = \theta_{max}$ ، حيث يندم مقام (مخرج) الكسر في العلاقة (21) وينتج عنه عدم تعيين. فحصلنا على خط مستقيم ميله $k = 1.186 \times 10^{-3} s^{-1}$ يمثل ثابت الجهاز حسب العلاقة (22).
- 9- أعدنا التجربة عدداً كافياً من المرات، ونبين في الجدول (2) النتائج التي حصلنا عليها.

الجدول (1): تحولات درجات الحرارة، و σ .

$t(s)$	$\theta_{air}(^\circ C)$	$\theta(^\circ C)$	σ	$t(s)$	$\theta_{air}(^\circ C)$	$\theta(^\circ C)$	σ
0	36.8	37.5	0.0388	1560	37.0	52.4	1.8718
120	36.8	39.6	0.1651	1680	37.7	52.7	1.9459
240	36.9	41.5	0.2895	1800	37.3	53.1	2.1429
360	36.7	43.1	0.4246	1920	37.0	53.4	2.3136
480	36.7	44.6	0.5569	2040	37.1	53.9	2.6335
600	36.9	46.1	0.6986	2160	37.0	54.3	3.0068
720	36.8	47.4	0.8582	2280	36.5	54.5	3.2852
840	36.8	48.3	0.9808	2400	37.3	54.6	3.3956
960	35.4	49.3	1.2107	2520	37.8	54.9	4.0604
1080	36.3	50.1	1.3099	2640	38.1	55.1	5.1417
1200	37.0	50.6	1.3754	2760	37.0	55.2	-----
1320	37.3	51.3	1.5238	2880	37.6	55.1	5.1705
1440	37.1	51.9	1.7020	3000	37.4	55.0	4.4886

الشكل (5): تحولات درجة الحرارة θ بدلالة الزمن t لكامل مجال القياس.الشكل (6): تحولات σ بدلالة الزمن t .الجدول (2): نتائج قياس الثابت k .

رقم التجربة	التاريخ	k (s^{-1})	Δk (s^{-1})
1	06/08/2008	1.089×10^{-3}	0.031×10^{-3}
2	14/08/2008	1.130×10^{-3}	0.010×10^{-3}
3	17/08/2008	1.186×10^{-3}	0.066×10^{-3}
4	07/09/2008	1.140×10^{-3}	0.020×10^{-3}
5	11/09/2008	1.115×10^{-3}	0.005×10^{-3}
6	20/09/2008	1.092×10^{-3}	0.028×10^{-3}
7	02/01/2009	1.056×10^{-3}	0.064×10^{-3}
8	10/01/2009	1.103×10^{-3}	0.017×10^{-3}
9	13/01/2009	1.111×10^{-3}	0.009×10^{-3}
10	03/06/2009	1.175×10^{-3}	0.055×10^{-3}

بأخذ المتوسط الحسابي \bar{k} لقيم الثابت k في التجارب العشرة السابقة نجد:

$$\bar{k} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{i=10} k_i = 1.120 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (23)$$

وأما قيم الانحرافات Δk فتحسب من العلاقة:

$$\Delta k_i = |k_i - \bar{k}| \quad (24)$$

وعليه فإن الخطأ المطلق في قيمة k تحسب بالشكل:

$$\Delta \bar{k} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{i=10} \Delta k_i = 0.031 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (25)$$

وبالتالي تعطى قيمة ثابت الجهاز بالشكل:

$$k = \bar{k} \pm \Delta \bar{k} = (1.120 \pm 0.031) \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (26)$$

وهي تمثل قيمة الثابت k التي سنستخدمها لجهاز IDSRTEmeter.

النتائج والمناقشة:

كما ذكرنا سابقاً فإننا سنستخدم القيمة النظرية للحرارة النوعية للألمنيوم؛ $c = 0.905 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ [4]، ومن أجل جهازنا المصمم كان لدينا:

$$\frac{c \cdot m}{A} = \frac{c \cdot m}{\pi \cdot r^2} = \frac{(0.905 \times 10^3) \times (90.91 \times 10^{-3})}{\pi \times (23.84 \times 10^{-3})^2} = 46.078 \times 10^3 \text{ J/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad (27)$$

ولإيجاد الشكل النهائي للمعادلات المستخدمة نبدل قيمة الثابت k من العلاقة (25) في العلاقة (19) و(21)، آخذين النتيجة من المعادلة (27) بعين الاعتبار، فنجد:

$$\theta = (\theta_{air} - \theta_{max}) \cdot e^{-1.120 \times 10^{-3} t} + \theta_{max} \quad (28)$$

$$I_{dir} = 51.6 \cdot \Delta \theta \quad (29)$$

باستخدام العلاقة (29) من أجل الجهاز المصمم، فإنه يمكن قياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر وبشكل مستمر طيلة اليوم بتوجيه الجهاز نحو الشمس مباشرة لنسمح فقط بدخول الإشعاع الشمسي المباشر وذلك باستخدام التوجيه ومتابعة تغيرات الحركة الظاهرية للشمس في السماء. حيث كما هو واضح بقياس درجة حرارة الهواء المحيط بالجهاز ودرجة حرارة الجسم الأسود في داخله؛ فإنه يمكن في أية لحظة التبديل بهما مباشرة في العلاقة (29) لإيجاد قيمة شدة الإشعاع الشمسي المباشر في منطقة القياس.

وقد أخذت القياسات في محافظة الحسكة في الشمال الشرقي من الجمهورية العربية السورية، تحديداً في مدينة الدراسة قرب الحدود السورية التركية. ونبين في الجدول (3) المعطيات الخاصة بمكان القياس.

الجدول (3): معطيات تاريخ ومكان قياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر.

اليوم	الخميس	خط الطول	40.65
التاريخ	2008/10/02	خط العرض	37.07
ساعة الشروق	06:14	الارتفاع	483 متر
منتصف النهار	12:07	حالة الطقس	صحو تام مع نسيم خفيف معتدل.
ساعة الغروب	17:59		

وفيما يلي نبين إحدى نتائج التجارب العملية لقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر $I_{dir(exp)}$ في منطقة القياس باستخدام العلاقة (29)، ونقارنها بالنتائج النظرية الموافقة، حيث أجرينا التجربة في المكان نفسه ليوم كامل، ووضعنا النتائج في الجدول (4).

تحسب النتائج النظرية اعتماداً على المعادلات (1-11)، وللتوضيح نذكر على سبيل المثال كيفية حساب إحدى القيم النظرية لشدة الإشعاع الشمسي المباشر، ولتكن مثلاً القيمة المحسوبة من أجل التوقيت الأقرب لمنتصف النهار، أي عند الساعة 12:00، فمن أجل يوم القياس يكون $n = 275$ وتكون $\omega = 6.32^\circ$ من المعادلات (3-7)، وتكون $\delta = -4.61^\circ$ من المعادلة (1)، ومن المعادلة (2) تكون $\theta_z = 42.1^\circ$ ، وحسب المعادلة (8) يكون $\alpha_s = 47.9^\circ$ ، ومنها يكون $m(z, \theta_z) = 1.272$ حسب المعادلة (9)، أما نفاذية الغلاف الجوي فتكون $\tau_{am} = 0.662$ من العلاقة (10)، وأخيراً من المعادلة (11) نجد أن $I_{dir(th)} = 905 \text{ W/m}^2$.

بشكل عام تعد العلاقات (1، 6) علاقات تقريبية، وهي تحوي على بعض الأخطاء [3]. ولكن من أجل الحساب الدقيق نلجأ إلى الاستعانة بالبرامج الحاسوبية لما توفره هذه الأخيرة من الدقة والسرعة. وقد استعنا بمعطيات برنامج StarCalc 5.73 إصدار عام 2006 [14]. واعتماداً على هذا البرنامج حصلنا على قيم α_s ، وحسبنا قيم $m(z, \theta_z)$ و τ_{am} و $I_{dir(th)}$ من العلاقات (9-11)، وهذا يفسر الخلاف البسيط بين القيمة $I_{dir(th)} = 905 \text{ W/m}^2$ المحسوبة سابقاً والقيمة الموافقة لها في التوقيت والمبينة في الجدول (4). وقد اعتمدنا البرنامج السابق لحساب قيم $I_{dir(th)}$ للحصول على أفضل النتائج النظرية لمقارنتها مع النتائج التجريبية التي حصلنا عليها.

الجدول (4): شدة الإشعاع الشمسي المباشر المقاسة $I_{dir(exp)}$ والنظرية $I_{dir(th)}$

Time	α_s (deg)	θ_{max} ($^\circ C$)	θ_{air} ($^\circ C$)	$\Delta\theta$ ($^\circ C$)	$I_{dir(exp)}$ (W/m^2)	$I_{dir(th)}$ (W/m^2)
06:00	-----	15.8	15.8	0	0	-----
06:30	2.7	17.3	16.2	1.1	56.8	159.5
07:00	8.5	21.7	16.9	4.8	247.7	394.7
07:30	14.2	26.1	17.7	8.4	433.4	534.8
08:00	19.9	30.2	18.8	11.4	588.2	640.2
08:30	25.3	32.8	19.5	13.3	686.3	718.1
09:00	30.5	35.6	20.5	15.1	779.2	777.6
09:30	35.4	37.3	21.2	16.1	830.8	823
10:00	39.7	39	22.3	16.7	861.7	855.9
10:30	43.5	40.7	23.5	17.2	887.5	880.6
11:00	46.4	41.8	24.3	17.5	903	897
11:30	48.4	43.1	25.4	17.7	913.3	907.3
12:00	49.2	44	26.3	17.7	913.3	911.2
12:30	48.8	44.5	26.9	17.6	908.2	909.3
13:00	47.3	44.8	27.3	17.5	903	901.7
13:30	44.8	44.5	27.3	17.2	887.5	888.2
14:00	41.4	43.7	27.1	16.6	856.6	867.4
14:30	37.3	43	26.9	16.1	830.8	838.2

15:00	32.6	41.8	26.5	15.3	789.5	798.2
15:30	27.6	40.1	26.0	14.1	727.6	746.1
16:00	22.2	37.5	25.3	12.2	629.5	675.6
16:30	16.6	34.7	24.6	10.1	521.2	582.5
17:00	10.9	30.5	23.6	6.9	356	459.4
17:30	5.1	24.8	22.7	2.1	108.4	276.7
18:00	-----	21.4	21.4	0	0	-----

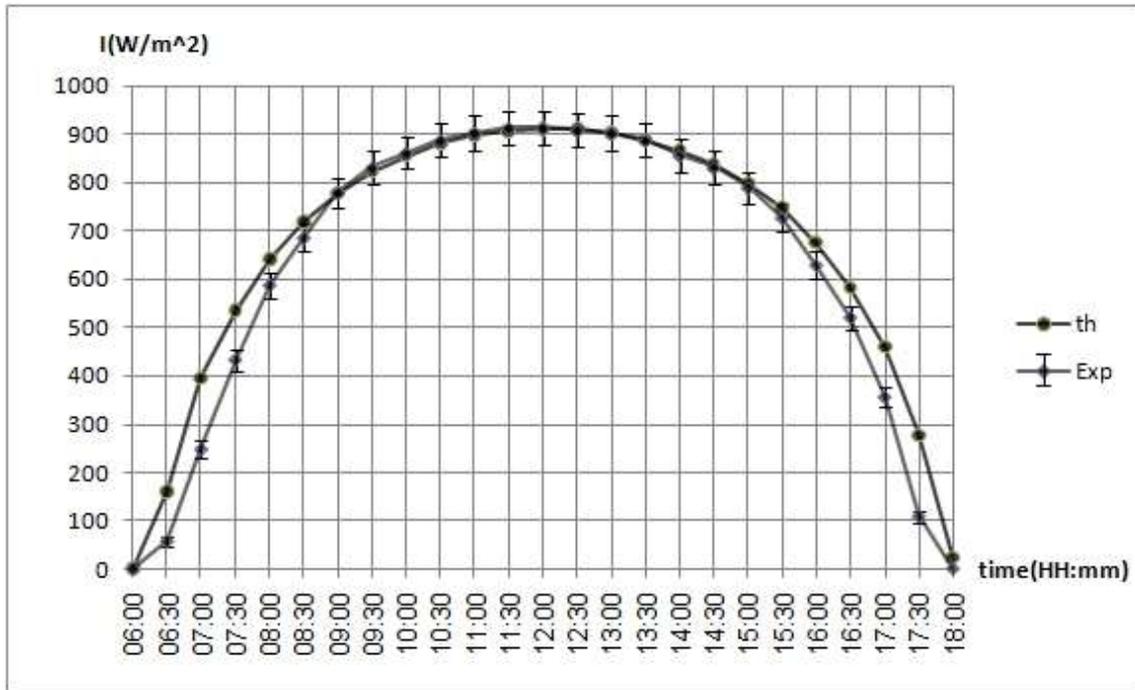
حُسب الخطأ في النتيجة التجريبية لقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر $\Delta I_{dir(exp)} (W/m^2)$ كما يأتي:

$$\frac{\Delta I_{dir(exp)}}{I_{dir(exp)}} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta k}{k} + \frac{2\Delta\theta}{\theta_{max} - \theta_{air}} \quad (30)$$

بإهمال الحدود الثلاثة الأولى من الطرف الثاني نظراً لصغرهما يكون:

$$\frac{\Delta I_{dir(exp)}}{I_{dir(exp)}} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{2\Delta\theta}{\theta_{max} - \theta_{air}} \quad (31)$$

نرسم تغيرات شدة الإشعاع الشمسي المباشر الوارد النظرية والتجريبية وكذلك الأخطاء المرتكبة خلال اليوم، فنحصل على الشكل (7) الآتي:



الشكل (7): مقارنة القيم المقاسة $I_{dir(exp)}$ مع القيم النظرية $I_{dir(th)}$ لشدة الإشعاع الشمسي المباشر.

وبالاعتماد على ما سبق نقول: أن تطبيق مبادئ بسيطة في الفيزياء الحرارية على نظام حراري مفتوح سمح لنا بقياس شدة الإشعاع الشمسي المباشر بطريقة سهلة واقتصادية. تشير هذه النتائج التي توصلنا إليها إلى مدى سهولة التطبيق والتعامل مع الجهاز المصنع، كما أن النتائج التي توصلنا إليها تبين وجود دقة جيدة واستجابة عملية كبيرة

للسياغة الرياضية والفيزيائية لعمل الجهاز، حيث تختلف القيم التجريبية عن القيم النظرية بحوالي 1% في فترة منتصف النهار، كما تتفق القيمة المقيسة في فترة منتصف النهار مع القيمة المقيسة في الخامس عشر من شهر تشرين الأول باستخدام البيرهليومتر في مدينة حمص وسط سورية [1].

أما عند طرفي النهار فنلاحظ وجود اختلاف أكبر، يتمثل بالقيم التي هي أقل من القيم النظرية، ووجد مثل هذا التناقص في عمل آخر وتم رده إلى زيادة طفيفة في عامل الكتلة الهوائية عند الابتعاد عن فترة منتصف النهار [1]. أما في حالتنا هذه والتي تعتمد التبادل الحراري أساساً للعمل فكأن ثمة ضياعاً أو تسريباً للطاقة الحرارية المجمعة من قبل الجسم الأسود في الجهاز، ونفس ذلك بأن أنبوية الجهاز تكون في هذه الحالات (عند طرفي النهار حيث تكون زاوية ارتفاع الشمس صغيرة) بوضع أفقي تقريباً، ما يسمح لتيارات الهواء المحيط بالدخول أكثر إليه وحدث انتقال حراري أكبر إلى الهواء المحيط على حساب الطاقة الإشعاعية الواردة مما يخل بالتوازن الحراري المدروس.

الاستنتاجات والتوصيات:

إن الجهاز المصمم خفيف الوزن (حوالي 2 kg)، صغير الحجم، يمكن استخدامه في القياسات الحقلية. وإن أهم ما يميز هذا الجهاز أنه لا يحتاج إلى معايرة في كل تجربة، حيث يغني حساب ثابت الجهاز k عن ذلك. كما أنه لا يحتاج إلى مرصد خاص، ويتميز بميزة خاصة أنه لا يحتاج إلى فريق عمل لاستخدامه إذ يمكن أن يجري القياس شخصاً واحداً. وبما أن الجهاز يعتمد على الأثر الحراري للإشعاع الشمسي الوارد إلى جسم أسود، فإنه يصلح من أجل جميع الأطوال الموجية الحرارية من الطيف الشمسي. وهذه تقع ضمن المجال $\{0.1\mu m - 1000\mu m\}$ [4]، أي كامل الطيف الوارد [10]، ما يرشح هذا الجهاز بالإضافة لمبدأ عمله لأن يكون في صف الأجهزة المستخدمة في هذا المجال خاصة عند أخذ العامل الاقتصادي في الحسبان.

ويحتاج هذا الجهاز إلى التحسين مستقبلاً كاستعمال جسم أسود من معدن مختلف يحقق نتائج أفضل، وذلك حتى يمكن استخدام الجهاز في الأيام الصافية وغير الصافية كافة وللتقليل من الزمن الميت (الفترة اللازمة لبلوغ الجهاز حالة التوازن الحراري) الذي هو حوالي 30 دقيقة ومدة الاستجابة (استجابة الجهاز للتغيرات السريعة في شدة الإشعاع الوارد)، وكذلك عند طرفي النهار يمكن تحسين الجهاز للحصول على قيم تجريبية مقيسة قريبة من القيم النظرية.

المراجع:

- [1] العبد الله، رياض؛ علي، شمس الدين. قياس مركبات الإشعاع الشمسي لأيام صافية في مدينة حمص-سورية، مجلة جامعة البعث، سلسلة العلوم الأساسية، المجلد (20)، العدد (3)، 1998، 237-254.
- [2] LANG, K. R. *A Companion to Astronomy and Astrophysics*. Springer, New York, 2006, 375.
- [3] DUFFIE, J. A; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 3^{ed}. ed, John Wiley & Sons, New York, 2006, 1- 42.
- [4] LIENHARD, J. H IV; LIENHARD, J. H V. *A Heat Transfer Textbook*. 3^{ed}. ed, Phlogiston Press, Cambridge, 2008, 749.

- [5] NATERER, G. F. *Heat Transfer in Single and Multiphase Systems*. CRC Press LLC, Boca Raton, London, New York, Washington, D.C, 2003, 603.
- [6] جبور، جبور؛ شعبان، هاني؛ نظام، محي الدين. قياس شدة الأشعة الشمسية الإجمالية في مدينة اللاذقية. مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، سلسلة العلوم الأساسية، المجلد (19)، العدد (6)، 1997، 35-53.
- [7] SABZIPARVAR, A. A. *A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran*, Elsevier-Renewable Energy 33, 2008, 1002-1010.
- [8] SABZIPARVARA, A. A; SHETAEEB, H. *Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran*, Elsevier-Energy 32, 2007, 649-655.
- [9] AL-MOHAMAD, A. *Global, direct and diffuse solar radiation in Syria*, Elsevier-Applied Energy 79, 2004, 191-200.
- [10] عياش، سعود يوسف. *تكنولوجيا الطاقة البديلة*. سلسلة عالم المعرفة، المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الكويت، العدد الثامن والثلاثون، 1981.
- [11] GREINER, W; NEISE, L; STOCKER, H. *Thermodynamics and Statistical mechanics*. 2nd. ed, Springer, New York, 1997, 463.
- [12] GAUTREAU, R; SAVIN, W. *theory and problems of modern physics* 2nd. ed, Schaum's Outlines Series, McGRAW-HILL, USA, 1999, 338.
- [13] BRONSON, R. *Differential Equations*, Schaum's Outlines Series, McGRAW-HILL, USA, 2003, 136.
- [14] *StarCalc Home Page*, 25/07/2008. <http://homes.relex.ru/~zalex/files_eng.htm>.

